

Wyznaczanie zależności kątowej prądu krytycznego I_c w wysokotemperaturowych taśmach nadprzewodnikowych 1G

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę teoretyczną oraz pomiarową zależności kątowej prądu krytycznego w wysokotemperaturowych taśmach nadprzewodnikowych (HTS) pierwszej generacji. Badania skupiały się na analizie wpływu wartości i kierunku pola magnetycznego na prądy krytyczne. W pracy opisano również budowę i działanie specjalnie zaprojektowanego stanowiska testowego, wykorzystującego magnesy neodymowe w konfiguracji Halbacha, które umożliwiają dokładne pomiary i charakteryzację taśm HTS. Wyniki badań potwierdziły zgodność z modelem Kima i pozwoliły na rozwój modelu gęstości prądu krytycznego, który może być wykorzystany w dalszych symulacjach komputerowych.

Abstract. The article presents a theoretical and measurement analysis of the angular dependence of the critical current in high-temperature superconducting (HTS) tapes of the first generation. The research focused on the impact of the value and direction of the magnetic field on critical currents. The paper also describes the construction and operation of a specially designed test station using neodymium magnets in the Halbach configuration, which allows for precise measurements and characterization of HTS tapes. The results confirmed the consistency with the Kim model and contributed to the development of a critical current density model that can be used in further computer simulations. (**Determination of the angular dependence of the critical current I_c in high-temperature superconducting tapes 1G**)

Słowa kluczowe: prąd krytyczny, taśmy nadprzewodnikowe wysokotemperaturowe, BiSCCO, anizotropia.

Keywords: critical current, High-Temperature Superconducting tapes, BiSCCO, anisotropy.

Wstęp

Wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe (HTS) znajdują zastosowanie w wielu aplikacjach przemysłu elektroenergetycznego, takich jak transformatory, ograniczniki prądu oraz kable elektroenergetyczne [1-2].

Projektowanie każdego z tych urządzeń wymaga znajomości wpływu zewnętrznych czynników na parametry taśm HTS. W szczególności, analiza dotyczy wpływu krytycznych pól, takich jak temperatura - T_c , pole magnetyczne - B_c , oraz krytyczna gęstość prądu - J_c .

Kluczowym parametrem z punktu widzenia projektowania urządzeń nadprzewodnikowych, wykorzystujących taśmy HTS jest określenie odpowiedniego punktu pracy. Jest to związane z możliwością maksymalnego wykorzystania materiału nadprzewodnikowego przy jednoczesnym uwzględnieniu szeregu ograniczeń. Jednym z ograniczeń dotyczących możliwości zwiększenia gęstości mocy w urządzeniach jest wartość prądu krytycznego oraz wpływ usytuowania taśm HTS względem linii sił pola zewnętrznego. Wynika to z faktu, że wszystkie urządzenia funkcjonują w określonych warunkach i konieczne jest uwzględnienie nie tylko wpływu własnego pola związanego z przepływem prądu transportowego, ale przede wszystkim pola zewnętrznego.

Wartość prądu krytycznego zależy od wartości indukcji magnetycznej (B) oraz orientacji linii sił pola magnetycznego względem taśmy HTS. Do określenia tych zależności można wykorzystać zarówno model Kima (1), jak i model magneto anizotropowy (2) [3-4].

$$(1) \quad I_{c0} \left(\frac{1}{1 + \frac{|B|}{B_{c0}} \epsilon(\theta)} \right)^b$$

$$(2) \quad I_{c0} \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{|B|}{B_{c0}} \right)^\alpha \epsilon(\theta)} \right)^b$$

gdzie: I_{c0} – prąd krytyczny przy polu własnym, $|B|$ – wektor indukcji magnetycznej, B_{c0} – wartość krytyczna indukcji magnetycznej, $\epsilon(\theta)$ – funkcja określająca anizotropię, b , α – współczynniki zależności I/B .

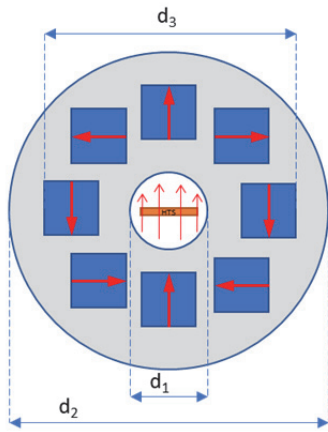
W związku z charakterystyczną zależnością dla każdej taśmy, w wielu ośrodkach naukowych stosowane są urządzenia do charakteryzacji taśm nadprzewodnikowych o wysokiej temperaturze (HTS) [5,6].

Proces ten obejmuje wyznaczanie prądów krytycznych różnych I_c w zmiennych warunkach zewnętrznych, z możliwością regulacji temperatury oraz pola magnetycznego na powierzchni taśmy. Konstrukcje używane do charakteryzacji taśm HTS często korzystają z elektromagnesów umieszczonych w konfiguracji cewek Helmholtza [7] w celu wytworzenia jednorodnego pola magnetycznego na badanej próbce oraz ruchomej platformy, która umożliwia zmianę położenia próbki względem linii sił pola magnetycznego.

Przykładem takiego rozwiązania jest system do pomiaru prądu transportu, opracowany przez naukowców z Nowej Zelandii [8], który charakteryzuje się wydajnością prądową na poziomie 1 kA i zdolnością do generowania pola magnetycznego na poziomie 8 T (dzielona cewka HTS), z możliwością regulacji temperatury od 20 K do 90 K. Jest to zaawansowany system pomiarowy, który umożliwia przeprowadzenie serii pomiarów w szerokim zakresie warunków środowiskowych. Jednakże, mimo wydajności tych systemów, dostępność charakteryzacji taśm HTS może być ograniczona dla mniejszych ośrodków naukowych z uwagi na koszty systemu.

W ramach prac badawczych omówionych w publikacji zaprezentowano wyniki badań kątowej charakteryzacji taśm HTS 1G, przeprowadzonej przy użyciu specjalnie zaprojektowanego urządzenia pomiarowego. Stanowisko testowe pozwala na charakteryzację taśm HTS z wykorzystaniem prostych metod pomiarowych oraz konfiguracji magnesów trwałych w układzie Halbacha, zapewniających jednorodne pole magnetyczne na powierzchni badanej próbki [9].

Generowane pole magnetyczne od 0 do 350 mT umożliwia określenie szeregu charakterystyk dla taśm HTS pod wpływem tzw. słabych pól magnetycznych. Uzyskane wartości są wystarczające do modelowania taśm używanych w prototypach elektroenergetycznych, takich jak kable nadprzewodnikowe, transformatory czy silniki. Dodatkowo, zastosowany układ obrotu umożliwia zmianę orientacji pola względem taśmy.



Rys. 1. Główna koncepcja układu. d_1 - średnica obszaru jednorodnego pola magnetycznego, d_2 - średnica zewnętrzna, d_3 - rozpiętość między magnesami, niebieskim oznaczone magnesy neodymowe.

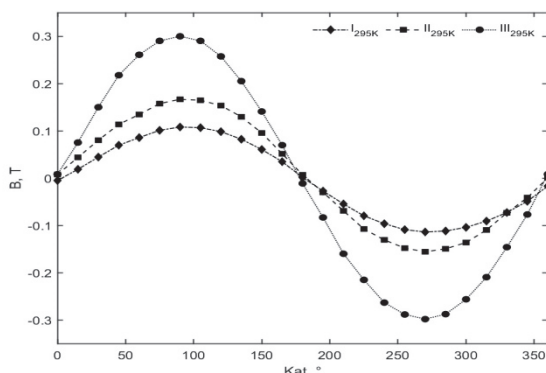
Koncepcja stanowiska badawczego

Koncepcja stanowiska badawczego zakłada wykorzystania konfiguracji magnesów trwałych ułożonych w macierz Halbacha celem wygenerowania jednorodnego pola magnetycznego na powierzchni taśmy, przedstawiono na Rys. 1.

Do opracowania stanowiska wykorzystano magnes neodymowe N42 w kształcie sześciangu o boku $a=10$ mm. Magnesy zostały osadzone w obudowie wykonanej z tworzywa PLA. Obudowa wykonana z wykorzystaniem druku 3D, co skutecznie przyspieszyło proces prototypowania.

Celem otrzymania różnych wartości pola na powierzchni taśmy wykonano trzy tarcze różniące się od siebie rozstawem magnesów- d_3 , co w konsekwencji wpływało na wartość pola na powierzchni taśmy. Roboczo oznaczono tarcze I, II, III. Po wykonaniu tarcz przeprowadzono testy.

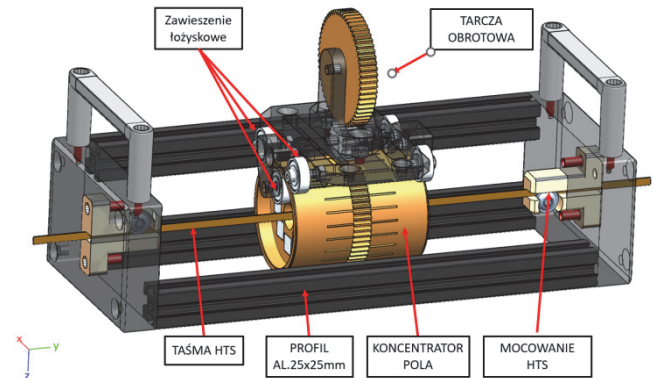
Z wykorzystaniem czujnika Halla CYSJ362A umieszczonego w centrum obszaru badawczego wyznaczono wartość indukcji w zależności od układu oraz w funkcji kąta w zakresie 0-360 stopni. Wyniki pomiarów zaprezentowano na Rys. 2, na którym widoczny jest sinusoidalny kształt pola magnetycznego na powierzchni taśmy związany z obrotem układu Halbacha względem własnej osi. Wartość przyłożonego pola magnetycznego zmienia się wraz ze zmianą kąta co istotnie wpłynie I_c



Rys. 2. Wyniki pomiarów pola magnetycznego czujnikiem CYSJ362A zrealizowane dla trzech różnych konfiguracji układów Halbacha: I, II, III.

Na Rys. 3 zaprezentowano pełny model stanowiska testowego do charakteryzacji taśm HTS. Charakteryzacja dokonywana jest taśmie o długości 20 cm, przy czym

obszar oddziaływania pola magnetycznego może wynosić w granicach 1-8 cm.



Rys. 3. Model stanowiska testowego do charakteryzacji taśm HTS.

Wybór taśmy HTS i metody pomiarowej

Jako taśmę odniesienia wykorzystano taśmę HTS pierwszej generacji BiSCCO. Jest to taśma wielofilamentowa, która cechuje się dużą zbieżnością zależności kątowej prądu krytycznego z wzorem Kima (1) co ukazuje pełny wpływ anizotropii materii nadprzewodnikowych. Przekrój poprzeczny taśmy przedstawiono na Rys. 3. Dodatkowo taśmy 1G cechują się lepszymi właściwościami mechanicznymi i większą odpornością na uszkodzenia niż taśmy 2G [11].

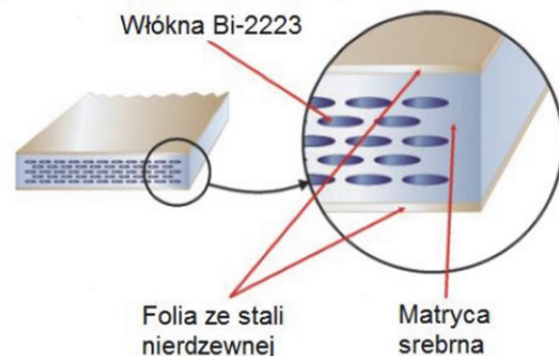
Do pomiarów przygotowano próbkę taśmy produkcji AMSC o prądzie krytycznym 122 A. Ponadto grubość taśmy to 0,31 mm, szerokość 4,1 mm a krytyczna średnica gięcia 50 mm.

Do pomiarów wykorzystano metodę czterozaciskową. Wymuszenie realizowane z wykorzystaniem zasilacza TDK Lambda GEN1500 w zakresie 0-200 A, pomiar spadku napięcia na odcinku 13,5 cm realizowany z wykorzystaniem nanowoltomierza Agilent U3402A. Układ został umieszczony w kąpeli ciekłego azotu celem utrzymania temperatury 77 K.

Wartość natężenia prądu krytycznego w taśmach wyznaczono z wykorzystaniem kryterium natężenia pola elektrycznego, dla którego normatywnie przyjęte wartości to: I Kryterium - $1\mu\text{V}/\text{cm}$ oraz II Kryterium - $0,1\mu\text{V}/\text{cm}$.

W celu wyznaczenia wartości prądów krytycznych, na podstawie zależności (3) wyznaczono wartości prądów krytycznych dla wybranych pięciu kątów: 0, 15, 30, 45, 90.

Wyniki pomiarów prądów krytycznych oraz porównanie kryteriów I, II przedstawiono na Rys.4.

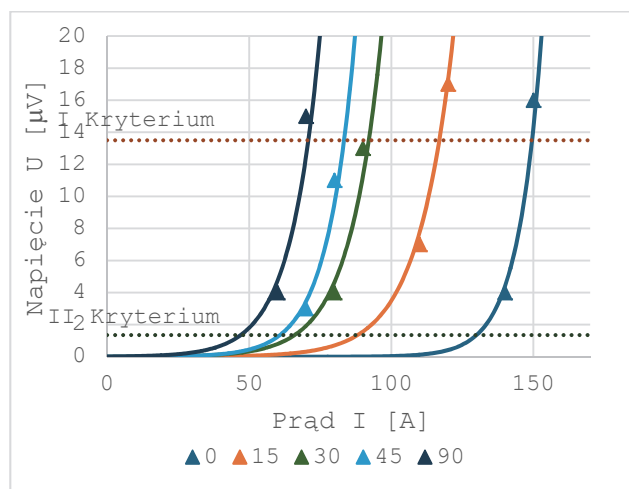


Rys. 3. Przekrój poprzeczny taśmy 1G BiSCCO [11].

Do dalszej analizy wybrano kryterium I z uwagi na mniejszą wrażliwość na zakłócenia w trakcie pomiaru. Wyznacza się jako punkt przecięcia osi kryterium I z charakterystyką.

$$(3) \quad U = U_c \left(\frac{I(B)}{I_c} \right)^{n(B)}$$

gdzie: U – napięcie na nadprzewodniku, U_c – krytyczne napięcie, powyżej którego nadprzewodnik przechodzi w stan normalny, $I(B)$ – prąd transportu w obecności pola magnetycznego I_c – prąd krytyczny, $n(B)$ – wykładnik potęgowy opisujący nieliniowość charakterystyki,



Rys. 4. Charakterystyka prądowo-napięciowa oraz porównanie kryterium prądów krytycznych wykonana dla wybranych pięciu kątów orientacji pola magnetycznego względem taśmy.

Dla pozostałych pomiarów wartość prądów krytycznych wyznaczono z wykorzystaniem logarymicznej linearyzacji. Dzięki wyznaczeniu regresji liniowej z charakterki prądowo-napięciowej można w prosty sposób wyznaczyć wartość prądów krytycznych u wykładników potęgowych zgodnie z zależnością (4).

$$(4) \quad I_c = K_r \frac{1}{A} e^{B/A}$$

gdzie: I_c – prąd krytyczny, K_r – wartość przyjętego kryterium, A – logarytm naturalny z wyznaczonej wartości

Wyznaczanie zależności kątowej prądów krytycznych

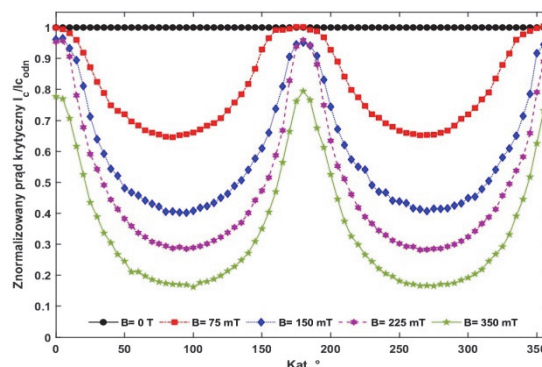
Badanie zależności kątowej polegało na pomiarze prądów krytycznych dla taśm HTS umieszczonych w obszarze badawczym. Wartość prądu krytycznego I_c wyznaczona została każdorazowo dla trzech różnych układów Halbacha oraz co pięć stopni obrotu. Łącznie wykonano 360 pomiarów. Wyniki pomiarów zaprezentowano na Rys. 5. W celu prezentacji wyników zaprezentowano znormalizowany prąd krytyczny, będący stosunkiem prądu krytycznego do prądu krytycznego własnego. Wyznaczenie prądu krytycznego dokonano w obdarciu o równanie (5).

$$(5) \quad \lambda = \frac{I_c}{I_{c0}}$$

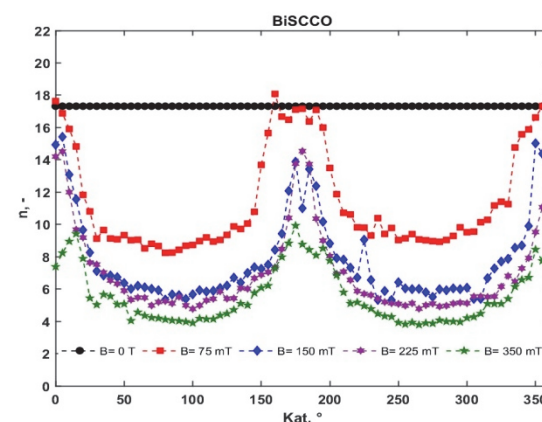
gdzie: I_c – prąd krytyczny mierzona, I_{c0} – prąd krytyczny dla pola własnego

Znormalizowany prąd krytyczny pozwala ukazać jaki sposób następuje redukcja prądów krytycznych a co za tym idzie użyteczność taśmy HTS w zależności od usytuowania taśmy względem linii pola magnetycznego oraz wartości pola magnetycznego. Cechą charakterystyczną taśm HTS 1G jest regularny eliptyczny kształt odpowiadający (1). Cechą niekorzystną taśm 1G jest znacząca redukcja możliwości przesyłu prądu transportu, która w przypadku

pola zewnętrznego pola magnetycznego 350 mT może osiągnąć 80%. Wobec powyższego projektując aplikacje energetyczne oparte o taśmy 1G należy tak dobrać punkt pracy, aby uwzględnić powyższe ograniczenia.



Rys. 5. Wyniki pomiarów znormalizowanego prądu krytycznego I_c w funkcji kąta oraz przyłożonego pola magnetycznego dla taśmy BiSCCO.



Rys. 6. Wartość znormalizowanego wykładnika potęgowego n w funkcji kąta oraz przyłożonego pola magnetycznego dla taśmy BiSCCO.

Charakterystyka prądów krytycznych cechuje się symetrią względem osi taśmy co jest cechą wyróżniającą taśmy 1G od taśm 2G.

Wykładnik potęgowy n opisujący nieliniowość charakterystyki przedstawiony na Rys. 6 jest ściśle powiązany z wyznaczonymi prądami krytycznymi. W przypadku zrealizowanych pomiarów wykładnik potęgowy osiąga maksymalną wartość 18 i zostaje zredukowane do 4 w przypadku umiejscowienia taśmy HTS prostopadłe do linii pola magnetycznego.

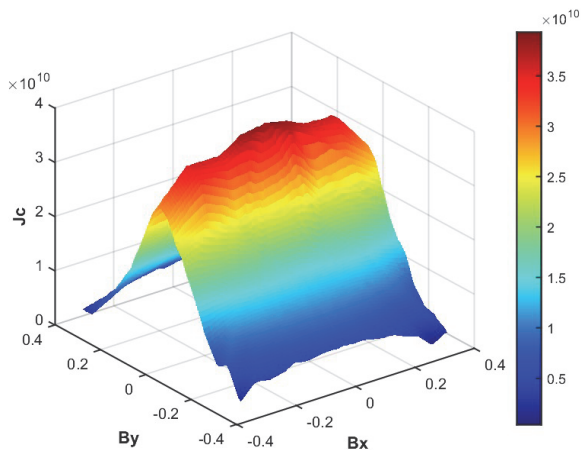
Charakteryzacje taśm HTS przeprowadza się także celem wyznaczenia niedostępnych pomiarowo wielkości np.: gęstości prądu krytycznego. Wielkości te wyznacza się wykorzystując dane pomiarowe i symulacje numeryczne z uwagi na skomplikowane charakter zjawiska oraz fakt, że w przypadku symulacji wykorzystujemy lokalną informację o natężeniu pola magnetycznego.

Gęstość prądu w taśmie HTS można opisać z wykorzystaniem zmodyfikowanego modelu Kima (6).

$$(6) \quad J_c(B_R; B_P) = \frac{J_{c0}}{\left[1 + \frac{\sqrt{(kB_R)^2 + B_P^2}}{B_c} \right]}$$

gdzie: B_R – składowa równoległa pola magnetycznego, B_P – składowa prostopadła pola magnetycznego, J_{c0} , B_c , k , b – stałe określające parametr taśmy HTS.

Szczególnie w przypadku badań w niskich polach magnetycznych zewnętrznych porównywalnych z polami generowanymi przepływem prądu transportu występuje pewna niedokładność. Przykładem modelu numerycznego uwzględniającego wpływ pola własnego opracowane są modele numeryczne, przykładem których jest metoda bezparametryczna MBP [12]. Na Rys. 7 zaprezentowano model numeryczny gęstości prądu krytycznego w badanej taśmie HTS 1G zrealizowane dla symulacji taśmy 1G.



Rys. 7. Model gęstości prądu J_c opracowany z wykorzystaniem MBP dla wyników pomiarów taśm BiSCCO produkcji AMSC.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań związanych z charakterystyką kątową taśm HTS pierwszej generacji. Badania zostały zrealizowane w oparciu o dedykowane stanowisko testowe wykorzystujące magnesy neodymowe w układzie Halbacha jako źródło pola magnetycznego, które stanowi prostą i tanią alternatywę obecnie stosowanych systemów pomiarowych i umożliwia przeprowadzenie rutynowej kontroli taśm w oparciu metodę szybkiego prototypowania.

W ramach przedstawionych wyników pomiarów zaprezentowano pełną charakterystykę kątową dla taśm HTS bardzo dobrze odwzorowującą zależności literaturowe oraz zbieżną z modelem Kima.

Dodatkowo wyniki pomiarów stanowiły podstawę do opracowania modelu gęstości prądów krytycznych w taśmach HTS, które mogą być wykorzystywane w symulacjach komputerowych. Wykorzystanie modeli w oparciu o MBP [12] pozwala na uwzględnienie realnej badanej taśmy w procesie projektowania.

Podsumowując przedstawione badania stanowią kompleksowe podejście do problemu charakterystyki taśm a zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne z uwagi na swoje właściwości oraz otrzymane wyniki pomiarów potwierdzenie koncepcji pomiarowej.

Autorzy: inż. Kamil Gruszczak, student kierunku elektrotechnika Politechnika Śląska, mgr inż. Krzysztof Habelok, dr inż. Paweł Lasek, dr hab. inż. Mariusz Stępień Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: krzysztof.habelok@polsl.pl

LITERATURA

- [1] B. G. Marchionini, Y. Yamada, L. Martini, H. Ohsaki, "High-Temperature Superconductivity: A Roadmap for Electric Power Sector Applications, 2015–2030," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, pp. 1-7, June 2017, Art no. 0500907, doi: 10.1109/TASC.2017.2671680.
- [2] H. Ritchie, P. Rosado, M. Roser (2020) - "Energy Production and Consumption" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/energy-production-consumption'
- [3] Kim, Y.B.; Hempstead, C.F.; Strnad, A.R. Critical persistent currents in hard superconductors. *Phys. Rev. Lett.* 1962, 9, 306–309.
- [4] Zhang, X.; Zhong, Z.; Ruiz, H.S.; Geng, J.; Coombs, T.A. General approach for the determination of the magneto-angular dependence of the critical current of YBCO coated conductors. *Supercond. Sci. Technol.* 2017, 30, 025010
- [5] A. -R. Kim et al., "Development of Critical Current Measurement System of HTS Tape Using Pulsed Current," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1-4, June 2016, Art no. 9001504, doi: 10.1109/TASC.2016.2517677.
- [6] M. Lao, J. Hänisch, S. Kauffmann-Weiss, R. Gehring, H. Fillinger, A. Drechsler, B. Holzapfel; High current variable temperature electrical characterization system for superconducting wires and tapes with continuous sample rotation in a split coil magnet. *Rev. Sci. Instrum.* 1 January 2019; 90 (1): 015106. <https://doi.org/10.1063/1.5078447>
- [7] S. Lin, and A. Kaufmann, "Helmholtz coils for production of powerful and uniform fields and gradients," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 25, no. 1, pp. 182, 1953
- [8] N. M. Strickland, C. Hoffmann, S. C. Wimbush; A 1 kA-class cryogen-free critical current characterization system for superconducting coated conductors. *Rev. Sci. Instrum.* 1 November 2014; 85 (11): 113907. <https://doi.org/10.1063/1.4902139>.
- [9] Soltner, H. and Blümner, P. (2010), Dipolar Halbach magnet stacks made from identically shaped permanent magnets for magnetic resonance. *Concepts Magn. Reson.*, 36A: 211-222. <https://doi.org/10.1002/cmr.a.20165>
- [10] Majka M., Kozak S.: Zastosowanie taśm I i II generacji do budowy nadprzewodnikowych ograniczników prądu. *Przegląd Elektrotechniczny* 5(89)/2009, 183–185.
- [11] Kwoka, R., Kozak, J., & Majka, M. (2018). Wyznaczanie charakterystyk $R = f(T)$ taśm nadprzewodnikowych pierwszej i drugiej generacji. *Informatyka, Automatyka, Pomiar i Gospodarka i Ochronie Środowiska*, 8(1), 71-74.
- [12] Zaremno, V. M., Habelok, K., Stępień, M., & Grilli, F. (2017). A parameter-free method to extract the superconductor's $J_c(B, \theta)$ field-dependence from in-field current-voltage characteristics of high temperature superconductor tapes. *Superconductor Science and Technology*, 30(3), 034001.